

Swing-by - wie funktioniert das?

In Bezug zur Nachricht „Der Bau der Jupitersonde JUICE beginnt“ in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ 4/2016, S.12

Gerhard Herms

Nahezu alle interplanetaren Raumsonden nutzen die Swing-by-Technik, um tiefer in den Weltraum vorzustoßen oder eine Nutzlast, die selbst für die stärkste Trägerrakete zu schwer ist, zum Ziel zu bringen. Die breite Öffentlichkeit hat das zwar zur Kenntnis genommen, hat jedoch keine oder nur verschwommene Vorstellungen von dem, was da geschieht. Dem Schüler Daniel geht es genauso, aber er empfindet das als ernsten Mangel. Er sucht seinen Freund, den Studenten Jan, auf und beide klären die Zusammenhänge in einem Gespräch.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Raumfahrt und Himmelsmechanik	Zweikörperproblem, Keplerbahnen, Hyperbeln, Näherungslösung Dreikörperproblem, Wirkungssphären, charakteristische Geschwindigkeiten, Nutzlast, Swing-by
Physik	Mechanik	Bezugssysteme, Relativgeschwindigkeit, Energie- und Impulserhaltung, Stöße
Fächerverknüpfung	Astronomie-Mathematik	Konstruktion Hyperbel, Asymptote



Blick in die Zukunft:
Januar 2030
 Die europäische Raumsonde Juice hat nach 7,5 Jahren Flug und Swing-by-Manövern an Erde, Venus, Erde und nochmals Erde den Jupiter erreicht und lenkt durch 2-stündiges Abbremsen mit dem Triebwerk und bremsendes Swing-by am Mond Ganymed in die Umlaufbahn ein. ©: ESA/AOES, http://sci.esa.int/science-media/img/9b/JUICE_artist_impression.jpg.

Jan: Du hattest vorhin bei deinem Anruf angedeutet, dass dir die Swing-by-Technik ein Buch mit 7 Siegeln sei.

Daniel: Ja. Man hört so viel davon, aber kaum einer weiß, wie das wirklich geht.

Jan: Ich habe mir vorhin schon einen Bericht herausgesucht, der etwa 1866 in der Fachpresse erschienen war und ein Swing-by am Jupiter beschreibt.

Daniel: Du meinst wohl 1966?

Jan: Nein, nein! Ich meine 1866.

Daniel: Das geht doch gar nicht! Da gab's doch noch keine Raumfahrt,...

Jan: ...wohl aber Swing-by. Im Jahre 1866 wurde nichts durchgeführt, sondern es ereignete sich. Es geschah ohne menschliches Zutun, aber unter den wachsamen Augen der Astronomen. Der Komet 1866 III kam dem Jupiter zu nahe und wurde in die Weiten des Weltraums hinausgeschleudert. Der Komet wurde nie wieder gesehen. Unzählige kleine Himmelskörper dürften im Laufe der Zeiten dasselbe Schicksal oder aber das gegenteilige Schicksal - nämlich den Absturz in die Sonne - erlitten haben.

Daniel: Ich habe schon etwas gelernt! Swing-by ist keine Erfindung des Menschen, sondern ein immer schon auftretender, naturgegebener Vorgang.

Jan: Richtig! Aber nun zu deinen Fragen!

Daniel: Mir ist völlig unklar, woher der weggeschleuderte Körper (z. B. der Komet 1866 III) die Energie nimmt. Wenn er dem Jupiter nahe kommt, wird er von diesem angezogen und beschleunigt, und zwar umso mehr, je kleiner die Entfernung zwischen beiden ist. Seine kinetische Energie nimmt ständig zu. Angenommen, er hat Glück und schlägt nicht auf der Oberfläche des Jupiters auf, dann folgt eine Phase, in der er sich wieder vom Jupiter entfernt. Die im Gravitationsfeld des Jupiters zusätzlich gewonnene kinetische Energie wird nun für den Aufstieg im Gravitationsfeld verbraucht. Am Ende, wenn der Körper sich wieder aus der Umarmung von Jupiter gelöst hat, ist nichts, aber auch gar nichts gewonnen.

Jan: Du meinst, hinsichtlich der Energie ist nichts gewonnen. Der Körper hat nach dem Vorbeiflug eine andere Flugrichtung, und schon das kann ein Gewinn für ein Raumflugunternehmen sein. Aber auch mit der Energie hat sich etwas getan. Deine Betrachtung ist nämlich unvollständig!

Daniel: Inwiefern?

Jan: Du musst berücksichtigen, dass der Jupiter eine Geschwindigkeit hat.

Daniel: Hm!

Jan: Bevor wir darauf eingehen, sollte ich noch ein paar grundlegende Dinge sagen. Swing-by ist ein Dreikörperproblem: Sonne, Umlenkplanet und Raumflugkörper. Es ist analytisch nicht lösbar. Da die Masse des Raumflugkörpers sehr klein ist, verglichen mit den Massen von Sonne und Planet, kann man das Problem näherungsweise behandeln, indem man dem Planeten eine sogenannte Wirkungs-

sphäre zuschreibt. Diese hat nach Pierre Simon Laplace den Radius $r_w = a_{\text{Pl}} \left(\frac{m_{\text{Pl}}}{m_{\text{Sonne}}} \right)^{\frac{2}{5}}$,

wobei die große Halbachse der Bahnellipse des Planeten ist.

Daniel: Diese Sphäre ist also umso größer, je weiter der Planet von der Sonne entfernt ist und je größer seine Masse ist. Was hat es mit der Sphäre auf sich?

Jan: Salopp ausgedrückt: Sie sperrt die Sonne aus und den Planeten ein.

Daniel: Ich beginne zu ahnen, welchen Sinn das hat! Im Inneren der Wirkungssphäre ist die Gravitation des Planeten so übermächtig, dass die Sonne außer Betracht bleiben kann. Dafür ist aber außerhalb der Wirkungssphäre allein die Sonne maßgebend.

Jan: Genau so ist es! Du erkennst auch die Vorteile eines solchen Vorgehens?

Daniel: Klar! In jedem der beiden Gebiete liegt ein Zweikörperproblem vor, das exakt lösbar ist und uns Ellipsen, eine Parabel oder Hyperbeln als mögliche Bahnen liefert.

Jan: Wenn es um Swing-by geht, kannst du dich bezüglich der Bahnen um den Planeten herum einschränken.

Daniel: Du hast Recht! Geschlossene Bahnen, also Ellipsen, nützen uns dabei wenig. Der Raumflugkörper wird von außen in die Wirkungssphäre hineingeschossen und verlässt sie wieder mit einer Geschwindigkeit vom gleichen Betrag. Das kann nur auf Hyperbeln geschehen.

Jan: Diese Bahnen wollen wir uns gleich mal näher ansehen! Ich habe hier 2 Abbildungen herausgesucht. Auf der ersten (Abb. 1) sind die Bahnen dreier Raumflugkörper dargestellt, die auf der gleichen Geraden anfliegen, aber etwas unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen (etwa je 20 % Unterschied). Die Gerade ist nichts anderes als die Bahntangente beim Einflug in die Wirkungssphäre und stimmt praktisch überein mit der einen Asymptote der Bahnhyperbel im Inneren der Wirkungssphäre. Welche Erkenntnis gewinnst du aus der Abbildung?

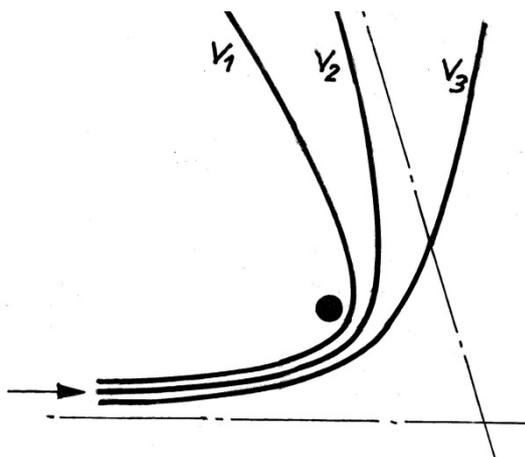


Abbildung 1:
Bahnverlauf im Zentrum der Wirkungssphäre bei gleichem Anflugkurs, aber verschiedenen Geschwindigkeiten v_1 , v_2 , und v_3 .

Es gelte: ($v_2 \approx 1,2 \cdot v_1$ $v_3 \approx 1,4 \cdot v_1$)

Daniel: Der Raumflugkörper wird umso weniger abgelenkt, je höher seine kinetische Energie ist.

Jan: Und was kannst du aus dieser Darstellung (Abb. 2) ableiten? Die Raumflugkörper, die alle gleich schnell sind, nähern sich auf parallelen Geraden, die mehr oder weniger dicht am Körper des Planeten vorbeiführen.

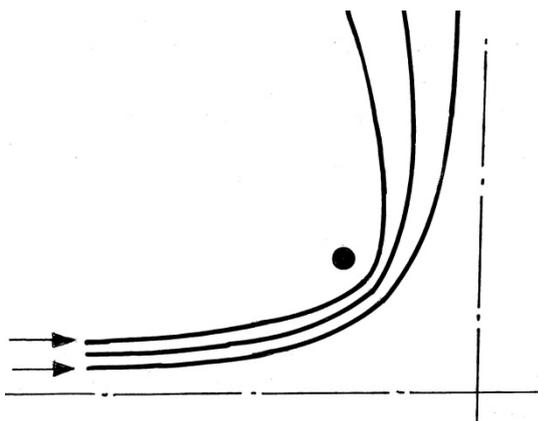


Abbildung 2:
Bahnverlauf im Zentrum der Wirkungssphäre bei gleichen Geschwindigkeiten, aber verschiedenen parallelen Anflugeraden.

Daniel: Je näher die Anfluggerade dem Planeten kommt, desto stärker ist die Ablenkung. Ich denke, hier haben wir das A und O der Swing-by-Technik! Das Flugleitzentrum muss durch geeignete Kurskorrekturen beim Anflug auf den Planeten dafür sorgen, dass die Anfluggerade im richtigen Abstand am Planeten vorbeigeht. Damit kann man erreichen, dass der Raumflugkörper die Wirkungssphäre in jeder gewünschten Richtung verlässt.

Jan: Wirklich? – Auch eine Ablenkung um 180° ?

Daniel: Verdammt! Du hast Recht. Das würde überaus starke Kräfte erfordern, also eine sehr große Annäherung an das Gravitationszentrum, was nicht geht, weil der Planetenkörper im Weg ist.

Jan: Richtig! Eine 180° -Ablenkung wäre nur bei einem punktförmigen Himmelskörper möglich. Aber noch ein Hinweis: Es lassen sich natürlich auch Ablenkungen erreichen, die den Raumflugkörper aus der Ekliptikebene herausführen.

Daniel: Ich vermute, dass dazu der Raumflugkörper etwas oberhalb oder unterhalb der Bahnebene des Planeten in die Wirkungssphäre einfliegen muss.

Jan: So ist es! Zum ersten Mal wurde dieser Weg beschritten von der Sonnensonde Ulysses. Sie wurde am 6. Oktober 1990 zusammen mit ihrer Oberstufe vom Space Shuttle Discovery auf den Weg gebracht und hatte ihren Swing-by am Jupiter am 8. Februar 1992. Dabei wurde ihre Geschwindigkeit auf 15,4 km/s gesteigert, was jahrelang Rekord war.

Daniel: Für so etwas scheint Jupiter wohl besonders geeignet zu sein, vermutlich wegen seiner großen Masse?

Jan: Das ist richtig. Aber auch Swing-by-Manöver an Venus und Erde sind nicht zu verachten. Ich erinnere an Cassini-Huygens. Diese Sonde war mit ihren rund 5,5 t Masse so schwer, dass die stärkste damals verfügbare Trägerrakete (eine Titan IV B mit Centaur-Oberstufe), sie nur mit 8 km/s auf den Weg bringen konnte. Für den Flug zu den äußeren Planeten wären 15,1 km/s nötig gewesen. Durch 2 Swing-by an der Venus (August 98 und Juni 99) wurde die Geschwindigkeit auf 13,6 km/s und durch ein weiteres Manöver an der Erde (August 1999) auf 19,1 km/s gebracht. Die Jupitersonde Juice, die 2022 starten soll, wird viermal Fahrt aufnehmen, einmal an der Venus und dreimal an der Erde.

Daniel: Phantastisch, was Swing-by leisten kann! Wenn ich doch nur verstehen würde, woher die Energie kommt.

Jan: Geduld! Wir haben jetzt alles zusammen und nur noch einen kleinen Schritt vor uns.

Daniel: Das ist ein kleiner Schritt für Menschen wie dich, aber ein riesiger Sprung für die normale Menschheit.

Jan: Nein, nein – es ist wirklich höchst einfach! Man muss nur drauf kommen oder darauf gebracht werden: Die Beschreibung der Bahnen im Gravitationsfeld eines Himmelskörpers setzt voraus, dass ein Bezugssystem verwendet wird, in dem dieser ruht. Außerhalb der Wirkungssphäre des Planeten muss ein Koordinatensystem verwendet werden, das sich relativ zur Sonne nicht bewegt und auch nicht rotiert.

Daniel: Ich verstehe! Im Inneren der Wirkungssphäre muss ein anderes Koordinatensystem genommen werden, das sich relativ zum Planeten in Ruhe befindet. Alles, was wir vorhin über die Hyperbelbahnen gesagt haben, gilt nur in diesem System.

Jan: Richtig! Das wollen wir uns an einem konkreten Beispiel klarmachen: Swing-by am Jupiter. Um das Verständnis zu erleichtern, nehmen wir der Einfachheit halber an, der Jupiter habe eine Ablenkung von 180° bewirkt...

Daniel: ...was eigentlich nur bei einem punktförmigen Jupiter möglich wäre.

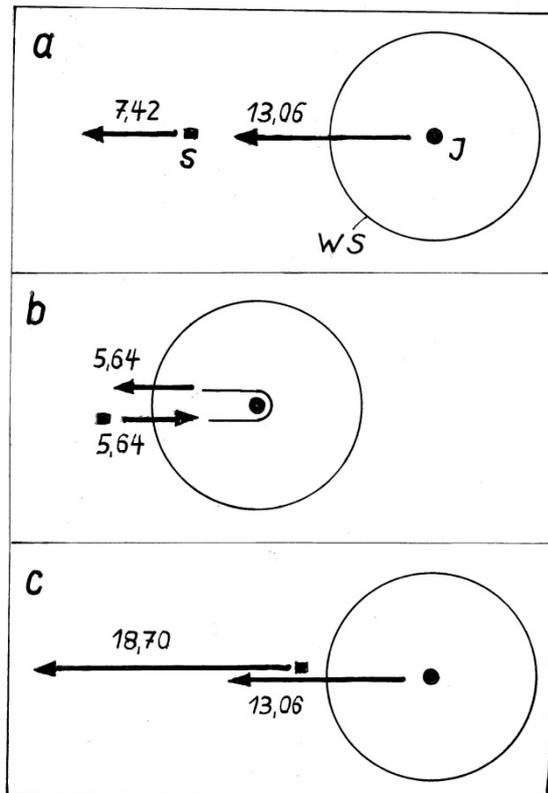


Abbildung 3:
Swing-by am Jupiter, beschrieben von 2 Bezugssystemen
aus (WS ... Wirkungssphäre):

- a.) **Bezugssystem Sonne**
Jupiter J bewegt sich mit 13,06 km/s auf seiner Umlaufbahn und kommt der Raumsonde S näher, die ihr Aphel erreicht hat und damit 7,42 km/s schnell ist.
- b.) **Bezugssystem Jupiter**
Die Raumsonde dringt mit 5,64 km/s in die Wirkungssphäre ein, durchläuft sie auf einer Hyperbelbahn und verlässt sie auch wieder mit 5,64 km/s.
- c.) **Bezugssystem Sonne**
In diesem Bezugssystem hat die aus der Wirkungssphäre kommende Sonde die Geschwindigkeit $13,06 \text{ km/s} + 5,64 \text{ km/s} = 18,70 \text{ km/s}$.

Jan: Ganz recht. Hier habe ich eine Zeichnung. Ganz oben (Abb.3 a) ist die Situation kurz vor dem Zusammentreffen vom Standpunkt des Sonnen-Bezugssystems dargestellt. Der Jupiter bewegt sich mit 13,06 km/s auf seiner Bahn und dicht vor ihm eine Raumsonde mit 7,42 km/s. Darunter (in Bild 3 b) wird die Raumsonde gezeigt, wie sie mit 5,64 km/s in die Wirkungssphäre eindringt.

Daniel: Von nun an beziehen wir uns auf das mit dem Jupiter verbundene Bezugssystem, in dem die Sonde eine Hyperbel beschreibt, um dann mit 5,64 km/s wieder aus der Wirkungssphäre auszutreten. Dabei fällt ihre Bahntangente schon fast mit der Asymptote zusammen.

Jan: Genau! Die untere Zeichnung (Bild 3 c) musst du jetzt erklären!

Daniel: Na ja! Hier sind wieder die Verhältnisse im Bezugssystem der Sonne dargestellt. Der Jupiter hat wieder seine Bahngeschwindigkeit von 13,06 km/s und die Raumsonde – mein Gott, jetzt habe ich's – die ist ja um 5,64 km/s schneller! Das bedeutet, dass sie vor dem Swing-by 7,42 km/s hatte und nun 18,70 km/s hat. Jetzt ist mir klar, wie die Geschwindigkeitserhöhung zustande kommt.

Jan: Ja, so einfach ist das. Vergiss aber nicht, dass dieser Wert nur bei einem punktförmigem Jupiter auftreten würde. Die größte wirklich erzielbare Ablenkung ergäbe sich, wenn der Scheitel der Hyperbel die Oberfläche des Jupiters gerade noch nicht berührt. Die Rechnung zeigt, dass dann noch $19,7^\circ$ vom 180° -Winkel fehlen, was sich aber relativ wenig auf die Geschwindigkeit auswirkt (18,56 km/s statt 18,7 km/s). Das kannst du alles in der folgenden Darstellung sehen (Abb. 4).

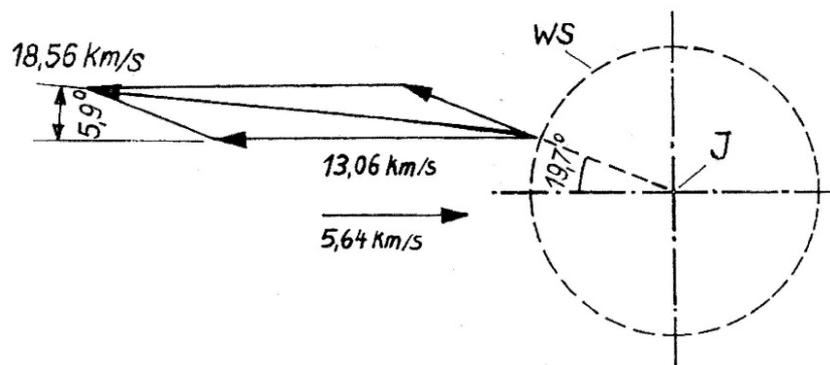


Abbildung 4:
Größtmögliche Ablenkung am
Jupiter bei Annäherung auf
Hohmann-Bahn und möglichst
dichtem Vorbeiflug.

Daniel: Das sieht recht wirklichkeitsnah aus.

Jan: Ist es auch, und auch die Gegebenheiten unmittelbar vor dem Swing-by (Abb. 3 a) sind keineswegs aus der Luft gegriffen. Sie liegen vor, wenn der Flug zum Jupiter auf einer Hohmann-Bahn erfolgt. Du weißt, was das ist?

Daniel: Diese Bahn erfordert den wenigsten Treibstoff. Die Umlaufbahn der Erde wird in tangentialer Richtung verlassen und die Übergangsbahn mündet tangential in die Umlaufbahn des Jupiters.

Jan: Richtig!

Daniel: Was ich aber noch immer nicht verstehe, ist, woher die beim Swing-by gewonnene Energie stammt.

Jan: Bevor wir das klären, muss ich noch darauf hinweisen, dass es auch Swing-by-Manöver gibt, bei denen die Energie des Raumflugkörpers reduziert wird.

Daniel: Das sind dann sicherlich missglückte Manöver

Jan: Keinesfalls! Ich muss deine Denkweise kritisieren. Sie ist allzu sehr diejenige eines Erdbewohners. Die normale Daseinsweise eines unbelebten Körpers auf der Erde ist die Ruhe. Soll er sich bewegen, muss Energie aufgewendet werden. Wird nicht ständig Energie zugeführt, kommt er bald wieder zur Ruhe. Abbremsen erfordert keinen großen Aufwand. Ganz anders ist es mit Himmelskörpern. Ihre normale Daseinsweise ist die Bewegung. Um ihren Bewegungszustand zu verändern, muss Arbeit geleistet werden, gleichgültig, ob ihre Bewegungsenergie erhöht oder verringert werden soll.

Daniel: Ich sehe keinen Sinn darin, einen Raumflugkörper, der mühevoll auf eine hohe Geschwindigkeit gebracht wurde, wieder abzubremesen.

Jan: Jetzt bist du aber etwas begriffsstutzig! Ein einfaches Beispiel: Eine Raumsonde hat die Erdgravitation überwunden und kreist nun auf der Erdbahn um die Sonne. Sie soll auf kürzestem Weg zur Sonne fliegen. Ihr jetziger Bewegungszustand besteht darin, mit rund 30 km/s auf einer Kreisbahn zu fliegen. Was ist zu tun?

Daniel: Entschuldige bitte! Du hast Recht! Der Sonde muss eine Geschwindigkeit von 30 km/s entgegengesetzt zu ihrer Flugrichtung erteilt werden. Dann hat sie und stürzt geradlinig zur Sonne.

Jan: Trägerraketen, die einem Körper eine Geschwindigkeit von 30 km/s erteilen können, gibt es noch nicht. Aber prinzipiell ist es richtig und du siehst, dass Abbremsungen genauso wichtig sind wie Geschwindigkeitserhöhungen.

Daniel: Wie muss das Swing-by gestaltet werden, um eine Abbremsung zu erreichen?

Jan: Betrachten wir noch mal die vorhin benutzte Abbildung (Abb. 3 a)! Für eine Abbremsung müsste der Jupiter vor der Raumsonde laufen und diese sich von hinten mit höherer Geschwindigkeit nähern. Wenn du die gleichen Überlegungen anstellst wie vorhin, wirst du feststellen, dass die Sonde nach Verlassen der Jupiter-Wirkungssphäre langsamer ist.

Daniel: Damit komme ich zurecht. Was mich bekümmert, ist, dass ich immer noch nicht verstehe, woher die Energie kommt bzw. wo sie bleibt.

Jan: Wenn die Raumsonde sich neuen Schwung holt, entnimmt sie Energie aus der Bewegungsenergie des Planeten...

Daniel: ...und abbremsende Sonden geben einen Teil ihrer Energie an den Planeten ab, nicht wahr?

Jan: Ja! Swing-by ist ein Stoßvorgang. Beim Stoß wird bekanntlich Energie und Impuls zwischen den Partnern ausgetauscht.

Daniel: Dieser Vergleich hinkt aber mächtig! Stoß ist eine äußerst kurzzeitige Wechselwirkung zwischen 2 Körpern. Ich denke z. B. an 2 aufeinander prallende Billardkugeln. Swing-by hingegen dauert recht lange.

Jan: Von „Vergleich“ ist keine Rede! Stoß und Swing-by sind dem Wesen nach gleichwertig. Da ich deinen Einwand schon erwartet hatte, habe ich aus meiner Vorlesungsmitschrift eine Notiz herausgesucht. Heinrich Hertz hat in seiner Doktorarbeit u.a. etwas geschrieben über den elastischen Stoß zweier riesiger Stahlkugeln von Erdgröße, die mit 1 cm/s aufeinandertreffen. Sie platten sich an der Berührungsstelle kreisförmig ab, wobei der Radius 32 km beträgt und die gegenseitige Berührung 27 Stunden dauert. Bei zwei Stahlkugeln von normaler Größe (2,5 cm Radius) wären es 0,13 mm und 0,00038 s. Du siehst, Zeitdauer ist nichts Wesentliches beim Stoß.

Daniel: Na gut! Aber was bringt das alles?

Jan: Ein vertieftes und erweitertes Verständnis des Swing-by! Unsere vorhin angestellten Betrachtungen (siehe Abb. 3) waren sehr einfach, weil die Raumsonde sich beim Eindringen in die Wirkungssphäre parallel zur Bahntangente des Planeten bewegte. Was ist aber, wenn sich die Sonde dem Planeten schräg von der Seite her nähert?

Daniel: Ich nehme an, dass man das Problem als schrägen Stoß behandeln kann.

Jan: Genau so ist es. Damit hast du die Flugprüfung für Swing-by bestanden! Aber im Ernst: Ich bin mir sicher, dass du den Kern der ganzen Sache verstanden hast, und darauf kommt es an.

Daniel: Ich bedanke mich und ziehe mich wieder in meine Wirkungssphäre zurück.